中国生态农业学报 2016 年 7 月 第 24 卷 第 7 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Jul. 2016, 24(7): 935−943

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.160159

基于密度联网试验和 Hybrid-Maize 模型的内蒙古玉米产量差和生产潜力评估*

李雅剑 王志刚** 高聚林** 孙继颖 于晓芳 胡树平
余少波 梁红伟 裴 宽

(内蒙古农业大学农学院 呼和浩特 010019)

摘 要 采用科学方法对内蒙古玉米产量差与生产潜力进行定量化研究，对合理规划内蒙古玉米增产途径及产业发展具有重要意义。本研究采用品种×密度联网试验和 Hybrid-Maize 模型模拟相结合的方法，利用 2006 年以来内蒙古各生态区历年高产攻关田的最高实测产量和各区域农户平均产量，对内蒙古全区和 6 大生态类型区的玉米产量差和生产潜力进行了系统分析。结果表明，各生态区的模拟产量、高产纪录、试验产量、农户产量皆表现为从东到西逐步提高。内蒙古玉米模拟产量潜力为 14.9 t·hm^{-2}，高产纪录产量为 14.4 t·hm^{-2}，试验产量为 11.1 t·hm^{-2}，农户产量分别实现了模拟产量潜力的 49%、高产纪录产量的 51%和试验产量的 66%。基于模型模拟的产量差(YG_M)、基于高产纪录的产量差(YG_R)和基于试验产量的产量差(YG_E)分别为 7.5 t·hm^{-2}、7.0 t·hm^{-2} 和 3.8 t·hm^{-2}。基于 YG_E 的短期生产潜力达 3 525.2 万 t，是当前总产水平的 1.6 倍，短期增产潜力为 1 191.9 万 t。其中，内蒙古东部的呼伦贝尔、兴安盟、通辽、赤峰 4 盟市对全区的增产贡献率将达 61%，西部的呼和浩特市、巴彦淖尔市为 16%。造成较大 YG_E 主要原因是栽培管理措施不当，缩小 YG_E 需要针对限制各生态区玉米增产的实际问题，通过栽培技术综合改良、技术简化和技术入户来逐步实现。

关键词 玉米 品种×密度联网试验 Hybrid-Maize 模型 产量差 生产潜力
中图分类号: S-03 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2016)07-0935-09

Understanding yield gap and production potential based on networked variety-density tests and Hybrid-Maize model in maize production areas of Inner Mongolia*

LI Yajian, WANG Zhigang**, GAO Julin**, SUN Jiying, YU Xiaofang,
HU Shuping, YU Shaobo, LIANG Hongwei, PEI Kuan

(College of Agronomy, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010019, China)

Abstract Exploitation of yield gaps in current maize production was needed for increasing grain yields to meet future food requirements. The quantification of yield gap and production potential by scientific method was critical for rational planning of production and development of maize industry in Inner Mongolia. This study combined cultivar and density network test data with Hybrid-Maize model simulation, and used data of recorded the highest yield since 2006, the average yield of the farmers

* 国家科技支撑计划项目(2013BAD07B04)、国家自然科学基金项目(31301265, 31460329)和内蒙古自治区高等学校青年科技英才支持计划(NJYT-14-B04)资助
** 通讯作者: 王志刚，主要从事作物高产高效栽培研究，E-mail: imauwzg@163.com; 高聚林，主要从事作物栽培、作物栽培生理、农业生态的研究与教学工作，E-mail: nmgaojulin@163.com
李雅剑，主要从事作物高产高效栽培研究。E-mail: liyajian.fly@163.com
收稿日期: 2016−02−20 接受日期: 2016−03−28

* The study was supported by the National Key Technologies R & D Program of China (2013BAD07B04), the National Natural Science Foundation of China (31301265, 31460329), and the Program for Young Talents of Science and Technology in Universities of Inner Mongolia Autonomous Region (NJYT-14-B04).
** Corresponding authors, WANG Zhigang, E-mail: imauwzg@163.com; GAO Julin, E-mail: nmgaojulin@163.com
Received Feb. 20, 2016; accepted Mar. 28, 2016

in different ecological regions in Inner Mongolia to analyze the yield gap and production potential of Inner Mongolia and its six ecological regions. Based on the modeled yield potential, the highest recorded yield, experimental yield and farmers' yield generally increased from the east to the west of Inner Mongolia. Maize yield potential in Inner Mongolia was 14.9 $t\cdot hm^{-2}$, with the highest recorded yield of 14.4 $t\cdot hm^{-2}$ and experimental yield of 11.1 $t\cdot hm^{-2}$. Farmers' yield reached 49% of the modeled yield potential, 51% of the highest recorded yield and 66% of the experimental yield. Yield gap based on the modeled yield potential (YG_M), the highest recorded yield (YG_R) and experimental yield (YG_E) was 7.5 $t\cdot hm^{-2}$, 7.0 $t\cdot hm^{-2}$ and 3.8 $t\cdot hm^{-2}$, respectively. Based on YG_E, the short-term production potential in Inner Mongolia was 3 525.2×10^4 tons (which was 1.6 times of the current maize production) and the short-term production gap was 1 191.9×10^4 tons. In the short-term, the four eastern regions (including Hulunber, Xing'an, Tongliao and Chifeng) contributed 61% to the production potential of the whole Inner Mongolia, while the western regions (including Hohhot and Bayannur) contributed only 16%. The main factor of high YG_E was inefficient cultivation management practice. To address this challenge, the countermeasures were recommended, such as comprehensive improvement of cultivation management practices, simplification of agronomic techniques easily adopted by farmers, for to gradually narrow YG_E.

Keywords Maize; Network variety-density test; Hybrid-Maize model; Yield gap; Production potential

据 FAO 预计，到 2050 年世界粮食总产须增加70%以上才能满足全球的需求[1]。对于中国而言，粮食增长速度每年至少应保持在 2%左右[2]。在耕地面积不断减少和短期内作物遗传产量难以大幅提高的背景下，实现增产目标需要不断缩小产量差来挖掘作物单产潜力[3–4]。内蒙古自治区(以下简称内蒙古)是我国重要的玉米产区，常年种植面积和总产量占全国的 10%左右，每年为国家提供商品玉米 60 亿 kg 以上，在保障国家粮食安全中居重要地位。但过去 10 年内蒙古玉米单产提高缓慢，平均每年仅提高 1.5%，至 2013 年平均单产为 6.5 $t\cdot hm^{-2}$，而最高产纪录则达 20 $t\cdot hm^{-2}$ 以上，说明内蒙古玉米具有很大的增产潜力。因此从区域尺度定量化内蒙古玉米产量潜力和产量差，对于制定合理策略来提高内蒙古玉米生产力具有重要意义。

产量差研究中，Lobell 等[5]确定了 5 个常用的产量平台，即模拟产量、高产纪录产量、试验产量、高产农户产量和平均农户产量。由于高产农户产量难于界定，Meng 等[4]对中国玉米的产量潜力和产量差研究中只采用了除高产农户产量外的 4 个产量平台，对应产生 3 级产量差：基于模拟产量潜力的产量差(YG_M)、基于高产纪录的产量差(YG_R)和基于试验产量的产量差(YG_E)。模拟产量和高产纪录常用来估算一个田块、区域或国家尺度上的最大产量潜力，是作物产量挖潜的长期目标，而试验产量是农民在一段时间内通过加强管理措施就可以实现的，对探索短期内的增产潜力具有重要意义。用于定量模拟产量的模型很多[6–10]，其中 Hybrid-Maize 模型因其对环境变化更为敏感，需要输入的参数少且不影响模型模拟精度[11]，其在美国[12–13]、南亚[14]和中国[11,15–18]的很多地区已得到很好的验证和应用。其对某一地区产量潜力的模拟中需要输入该地区适宜的种植密度，但不同地区由于气候条件和品种差异，适宜的密度往往难以精确获得。另外，试验产量往往需要很大的数据量，从国家尺度上研究因可获得大量文献数据而较易实现，但从区域尺度而言则往往受到限制。

针对上述问题，本研究设计覆盖内蒙古六大生态区的品种×密度多年联网试验，在获得各生态区合理种植密度和试验产量的基础上，利用 Hybrid-Maize 模型模拟获得模拟产量潜力，并结合 2006 年以来各生态区历年高产攻关田实测产量，对内蒙古玉米各级产量差与增产潜力进行定量化研究，为探讨内蒙古玉米增产途径及产业发展规划提供参考。

1 材料与方法

1.1 密度联网试验

试验产量是农民在专家指导下优化管理措施，在当地生态条件下，投入较低的成本以及较小环境风险所获得的产量[4]。因内蒙古玉米主产区中各生态类型区的气候和生产条件存在较大差异，为了科学评估各生态区的试验产量，2011—2013 年，分别在内蒙古的六大生态区——大兴安岭东温凉区(呼伦贝尔市)、大兴安岭南温暖区(兴安盟)、西辽河平原区(通辽市)、燕山丘陵区(赤峰市)、土默川平原区(呼和浩特市)和河套平原区(巴彦淖尔市)进行密度联网试验，以最高产密度产量的多年平均值作为试验产量。各生态区试验地点的经纬度、玉米生育期内 60 年(1951—2012 年)平均气象参数(太阳辐射、日最高温、日最低温、降雨量)见表 1。

品种×密度联网试验以'郑单 958'(呼伦贝尔市因'郑单 958'不能正常成熟，以'德美亚 1 号'代替)、'先

表 1　内蒙古各生态区玉米密度联网试验点经纬度和 60 年(1951—2012 年)平均气象参数
Table 1　Locations and 60-year meteorological indexes of the networked variety-density tests of maize in different ecological regions of Inner Mongolia

生态区 Ecological region	地区 Experimental site	纬度 Latitude	经度 Longitude	太阳辐射 Solar radiation (MJ·m^{-2})	日最高温 Daily maximum temperature (℃)	日最低温 Daily minimum temperature (℃)	降雨量 Precipitation (mm)
大兴安岭东温凉区 East cold region of Great Khingan Mountain	呼伦贝尔市 Hulunber	47°20′N	122°22′E	2 530.0	24.1	11.1	360.0
大兴安岭南温暖区 South warm region of Great Khingan Mountain	兴安盟 Xing'an	46°45′N	122°47′E	2 744.0	25.1	12.7	367.0
西辽河平原区 West Liao River Plain	通辽市 Tongliao	43°44′N	122°32′E	3 008.0	26.2	14.2	328.0
燕山丘陵区 Yan Hilly region	赤峰市 Chifeng	42°18′N	118°10′E	3 058.0	26.1	13.5	324.0
土默川平原区 Tumochuan Plain	呼和浩特市 Hohhot	40°75′N	111°67′E	3 280.0	24.7	11.4	348.0
河套平原区 Hetao Plain	巴彦淖尔市 Bayannur	41°11′N	108°49′E	3 595.0	25.5	11.3	119.0

玉 335’和 2 个当地主栽品种为材料(表 2), 设置 4.5 万株·hm^{-2}、6.0 万株·hm^{-2}、7.5 万株·hm^{-2}和 9.0 万株·hm^{-2} 4 个种植密度, 各地根据当地玉米养分需求规律进行测土配方施肥, 保证充足的氮、磷、钾养分供应; 灌溉、除草等其他管理措施同当地大田生产。玉米生理成熟期, 取无缺苗断垄长势整齐的两行实收, 待果穗风干后(籽粒含水量 14%)脱粒, 测定实收区产量, 并计算群体产量。

表 2　玉米密度联网试验各生态区选用品种、灌溉条件和试验年份
Table 2　Varieties, water management and study years of the networked variety-density tests of maize in different ecological regions of Inner Mongolia

地区 Experimental site	生态区 Ecological region	玉米品种 Maize variety	灌溉条件 Water management	试验年份 Study year
呼伦贝尔市 Hulunber	大兴安岭东温凉区 East cold region of Great Khingan Mountain	德美亚 1 号、先玉 335、九玉 1034、包玉 2 号 Demeiya 1, Xianyu 335, Jiuyu 1034, Baoyu 2	雨养 Rainfed	2012—2013
兴安盟 Xing'an	大兴安岭南温暖区 South warm region of Great Khingan Mountain	郑单 958、先玉 335、兴垦 9 号、德美亚 1 号 Zhengdan 958, Xianyu 335, Xingken 9, Demeiya 1	雨养 Rainfed	2012—2013
通辽市 Tongliao	西辽河平原区 West Liao River Plain	郑单 958、先玉 335、通科 1 号、金山 27 号 Zhengdan 958, Xianyu 335, Tongke 1, Jinshan 27	灌溉 Irrigation	2011—2013
赤峰市 Chifeng	燕山丘陵区 Yan Hilly region	郑单 958、先玉 335、丰田 13、农华 101 Zhengdan 958, Xianyu 335, Fengtian 13, Nonghua 101	灌溉 Irrigation	2011—2013
呼和浩特市 Hohhot	土默川平原区 Tumochuan Plain	郑单 958、先玉 335、丰田 6、内单 314 Zhengdan 958, Xianyu 335, Fengtian 6, Neidan 314	灌溉 Irrigation	2011—2013
巴彦淖尔市 Bayannur	河套平原区 Hetao Plain	郑单 958、先玉 335、亨达 988、宁玉 524 Zhengdan 958, Xianyu 335, Hengda 988, Ningyu 524	灌溉 Irrigation	2011—2013

1.2　基于 Hybrid-Maize 模型的模拟产量潜力

利用 Hybrid-Maize 模型对玉米产量潜力进行模拟。Hybrid-Maize 模型是将 CERES-Maize 玉米专用模型中的玉米发育及器官生长模块与 INTERCOM 和 WOFOST 作物通用模型中的光合和呼吸模块进行组合后, 另外加入一些新模块而形成的新模型, 它是通过数学公式利用气候、土壤特性和管理因素而定量描述玉米生长过程的作物模拟模型[13]。模型输入的气象数据(1951—2012 年)来源于距试验点最近的气象站点, 主要包括: 日最高温度、日最低温度、平均相对湿度、降水量、日照时数和风速; 密度来源于品种×密度联网试验结果; 其他参数包括播期、品种 GDD 等与当地大田生产相同。

1.3　高产纪录产量和平均农户产量

高产纪录产量是农民在专家的指导下, 在最适宜的生态条件下, 不计成本投入及环境风险所得到的最大产量[4]。本文高产纪录产量数据来源于 2006—2015 年内蒙古各生态区 10 年 81 个点次高产攻关田的最高实测产量数据, 平均农户产量采用近 10 年来单产最高年份 2013 年的产量数据, 数据来源于《内蒙古统计年鉴》。

1.4　有关参数计算

基于模型模拟的产量差(YG_M)=模拟产量潜力–农户产量　(1)

基于高产纪录的产量差(YG_R)=高产纪录产量–农户产量 (2)

基于试验产量的产量差(YG_E)=试验产量–农户产量 (3)

短期生产潜力=试验产量×当地玉米种植面积 (4)

短期增产潜力=YG_E×当地玉米种植面积 (5)

长期生产潜力=模拟产量×当地玉米种植面积 (6)

长期增产潜力=YG_M×当地玉米种植面积 (7)

1.5 数据分析

采用 Microsoft Excel 2003 统计分析数据，利用 Sigmaplot 10.0 作图。

2 结果与分析

2.1 内蒙古各生态区玉米的试验产量与适宜密度

图 1 为通过密度联网试验所获得的各生态区玉米产量与密度的关系。除河套平原区(巴彦淖尔市)外，其他各生态区最高产密度均在 7.5 万株·hm^{-2} 左右，密度超过 7.5 万株·hm^{-2} 产量则略有降低，但差异不显著。河套平原区因具备较好的光照和灌溉条件，其试验产量在 9.0 万株·hm^{-2} 时达到最高，为 13.9 t·hm^{-2}；其次为土默川平原区(呼和浩特市)，为 13.3 t·hm^{-2}；西辽河平原区(通辽市)、燕山丘陵区(赤峰市)密度在 7.5 万株·hm^{-2} 下试验产量分别为 12.3 t·hm^{-2} 和 10.8 t·hm^{-2}；大兴安岭东温凉区(呼伦贝尔市)、大兴安岭南温暖区(兴安盟)密度在 7.5 万株·hm^{-2} 下试验产量均为 8.2 t·hm^{-2} 左右。

2.2 内蒙古各生态区玉米模拟产量、高产纪录、试验产量及农户产量的比较

各生态区 4 个产量平台的统计值见表 3。内蒙古全区模拟产量(产量潜力)平均为 14.9 t·hm^{-2}，变化范围为 4.2~22 t·hm^{-2}；全区高产纪录产量平均为 14.4 t·hm^{-2}，变化范围为 8.4~19.2 t·hm^{-2}；试验产量平均为 11.1 t·hm^{-2}，变化范围为 3.1~18.9 t·hm^{-2}；全区农户产量为 7.4 t·hm^{-2}。总体上 4 个产量平台的产量皆呈从东到西逐步提高的趋势。

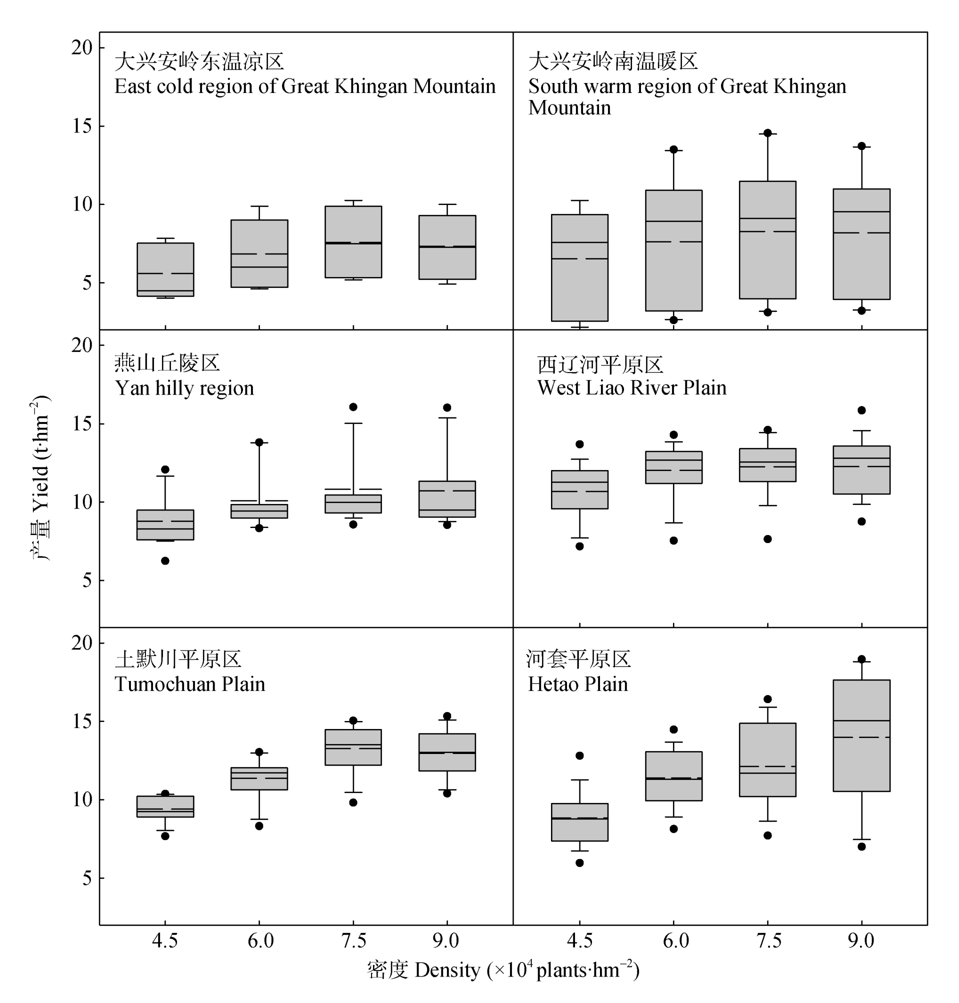


图 1 2011—2013 年各生态区玉米种植密度与试验产量关系

Fig. 1 Relationships between planting density and the experimental yield of maize in different ecological regions of Inner Mongolia during 2011—2013

4 个灌溉区之间, 玉米模拟产量最高的为巴彦淖尔市, 产量达 18.0 t·hm^{-2}, 其后依次为赤峰市(17.3 t·hm^{-2})、通辽市(17.0 t·hm^{-2})、呼和浩特市(16.7 t·hm^{-2}); 高产纪录产量平均值最高的为赤峰市(17.2 t·hm^{-2}), 其次为巴彦淖尔市(16.8 t·hm^{-2})、通辽市(16.3 t·hm^{-2}), 分别实现了产量潜力的 99%、93%、96%; 呼和浩特高产纪录产量最低, 为 15.7 t·hm^{-2}, 实现了产量潜力的 94%。巴彦淖尔市农户产量为 9.5 t·hm^{-2}, 均高于其他地区, 通辽市、赤峰市农户产量分别为 7.7 t·hm^{-2}和 7.5 t·hm^{-2}, 呼和浩特市农户产量最低, 为 6.7 t·hm^{-2}。

从雨养区来看, 兴安盟的模拟产量潜力(10.6 t·hm^{-2})高于呼伦贝尔(9.7 t·hm^{-2}), 高产纪录产量平均为 10.7 t·hm^{-2}, 呼伦贝尔市略低, 为 9.6 t·hm^{-2}; 两个生态区农户产量均在 6.3 t·hm^{-2} 左右。

表 3　内蒙古各生态区模拟产量、高产纪录、试验产量和农户产量

Table 3　Modeled yield, highest recorded yield, experimental yield and farmers' yield in different ecological regions of Inner Mongolia

t·hm^{-2}

产量平台 Yield platform	统计指标 Statistic indicator	地区 Region						
		呼伦贝尔市 Hulunber	兴安盟 Xing'an	通辽市 Tongliao	赤峰市 Chifeng	呼和浩特市 Hohhot	巴彦淖尔市 Bayannur	内蒙古 Inner Mongolia
模拟产量 Modeled yield	平均值 Average	9.7	10.6	17.0	17.3	16.7	18.0	14.9
	变化范围 Range	4.2~16.7	6.4~18.1	10.5~20.4	12.2~21.3	10.6~20.2	12.3~22	4.2~22
	标准偏差 Standard deviation	2.9	4.8	2.1	1.8	2.3	3.4	4.8
高产纪录 Highest recorded yield	平均值 Average	9.6	10.7	16.3	17.2	15.7	16.8	14.4
	变化范围 Range	8.4~10.1	9.8~11.5	14.2~18.6	15.3~19.2	15.0~17.4	15.1~18.8	8.4~19.2
	标准偏差 Standard deviation	0.7	0.6	1.2	1.3	0.6	1.0	2.4
	点数 Number	15	7	15	19	14	11	81
试验产量 Experimental yield	平均值 Average	8.2	8.3	12.3	10.8	13.3	13.9	11.1
	变化范围 Range	5.2~13.6	3.1~14.6	7.4~15.1	8.6~16.1	9.8~15.0	6.9~18.9	3.1~18.9
	标准偏差 Standard deviation	2.9	4.1	1.8	2.3	1.4	4.0	3.3
农户产量 Famers' yield	平均值 Average	6.3	6.5	7.7	7.5	6.7	9.5	7.4

2.3　内蒙古各生态区的产量差分析

基于模拟产量、高产纪录和试验产量计算出对应的产量差(YG_M、YG_R、YG_E)如表 4 所示, 全区 YG_M、YG_R 分别为 7.5 t·hm^{-2} 和 7.0 t·hm^{-2}, 农户产量分别实现了产量潜力、高产纪录的 49%和 51%, 全区的 YG_E 为 3.8 t·hm^{-2}, 农户产量实现了试验产量的 66%。

灌溉区中, 呼和浩特市、赤峰市 YG_M、YG_R 最高, YG_M 分别为 10.0 t·hm^{-2} 和 9.8 t·hm^{-2}, 农户产量仅实现了产量潜力的 40%、43%, YG_R 分别为 8.9 t·hm^{-2}、9.7 t·hm^{-2}, 农户产量分别实现了高产纪录的 43%和 44%; 其次为通辽市, YG_M、YG_R 分别为 9.3 t·hm^{-2} 和 8.6 t·hm^{-2}, 农户产量分别实现了产量潜力和高产纪录的 45%和 47%; 巴彦淖尔市的 YG_M、YG_R 均为最低, 分别为 8.5 t·hm^{-2} 和 7.4 t·hm^{-2}, 农户产量分别实现了产量潜力和高产纪录的 53%、56%。雨养区中, 兴安盟 YG_M 和 YG_R 分别为 4.1 t·hm^{-2} 和 4.2 t·hm^{-2}, 农户产量实现了产量潜力和高产纪录的 61%左右; 呼伦贝尔 YG_M 和 YG_R 略低, 分别为 3.4 t·hm^{-2} 和 3.3 t·hm^{-2}, 农户产量实现了产量潜力和高产纪录的 65%和 66%。

从基于试验产量的产量差(YG_E)来看, 呼和浩特市的 YG_E 最高, 为 6.6 t·hm^{-2}, 农户产量仅实现了试验产量的 51%, 呼伦贝尔市、兴安盟 YG_E 仅为 1.8 t·hm^{-2} 左右, 而农户产量实现了试验产量的 77%左右, 通辽市、巴彦淖尔市和赤峰市的 YG_E 在 3.3~4.5 t·hm^{-2}, 农户产量实现了试验产量的 63%~69%。

2.4　内蒙古玉米短期、长期生产潜力分析

2015 年内蒙古玉米种植面积达 346.7 万 hm^2, 根据国家《"镰刀弯"地区玉米结构调整规划(2016—2020 年)》, 内蒙古作为横跨东北冷凉区、北方农牧交错区、西北风沙干旱区的"镰刀弯"地区重点区域, 玉米种植面积将调减 33.3 万 hm^2 左右, 基本恢复至 2013 年的面积水平。因此, 本文以 2013 年各盟市玉米种植面积为依据, 根据产量差分析结果, 计算玉米生产潜力及增产目标。在 3 个层次产量差中, 要想缩小 YG_M 和 YG_R, 对于现有的生产条件而言有很大难度, 应该作为长期增产目标对生产潜力进行评

表 4 内蒙古各生态区 YG_M、YG_R、YG_E 及农户产量实现各产量潜力的比例

Table 4 YG_M, YG_R, YG_E and the ratio of the farmers' yield to modeled yield, highest recorded yield, and experimental yield in different ecological regions of Inner Mongolia

参数 Index		地区 Region						
		呼伦贝尔市 Hulunber	兴安盟 Xing'an	通辽市 Tongliao	赤峰市 Chifeng	呼和浩特市 Hohhot	巴彦淖尔市 Bayannur	内蒙古 Inner Mongolia
产量差 Yield gap	YG_M ($t\cdot hm^{-2}$)	3.4	4.1	9.3	9.8	10.0	8.5	7.5
	YG_R ($t\cdot hm^{-2}$)	3.3	4.2	8.6	9.7	8.9	7.4	7.0
	YG_E ($t\cdot hm^{-2}$)	1.9	1.8	4.5	3.3	6.6	4.4	3.8
农户产量/模拟产量 Farmers' yield/modeled yield (%)		65	61	45	43	40	53	49
农户产量/高产纪录 Farmers' yield/highest recorded yield (%)		66	61	47	44	43	56	51
农户产量/试验产量 Farmers' yield/experimental yield (%)		77	78	63	69	51	68	66

YG_M: 基于模型模拟的产量差; YG_R: 基于高产纪录的产量差; YG_E: 基于试验产量的产量差。YG_M: yield gap between farmer's yield and modeled yield; YG_R: yield gap between farmer's yield and the highest recorded yield; YG_E: yield gap between farmer's yield and experimental yield.

估。从本研究结果看，各地区的 YG_M 和 YG_R 十分接近，但由于 YG_R 是基于良好生态条件、不计成本投入和环境风险得到的产量[4]，且年际间又有很大波动，因此本研究选用基于长期气象背景和优化栽培条件的模拟产量及其 YG_M 来评估玉米长期增产目标和生产潜力。对于 YG_E 而言，因试验产量是农民在专家指导下优化管理措施，在当地生态条件下，投入较低的成本以及较小环境风险所获得的产量，是短期内可以获得的产量，故选择试验产量及其 YG_E 来评估短期增产目标和生产潜力。

由表 5 可见，全区长期生产潜力将达 4 719.0 万 t，是当前总产水平的 2.2 倍；长期增产潜力为 2 385.1 万 t，东四盟(呼伦贝尔市、兴安盟、通辽市、赤峰市)对于全区增产贡献率将为 69%，西部区(呼和浩特市、巴彦淖尔市)对于全区增产贡献率为 13%。全区短期生产潜力将达 3 525.2 万 t，是当前总产水平的 1.6 倍；短期增产潜力为 1 191.9 万 t，东四盟(呼伦贝尔市、兴安盟、通辽市、赤峰市)因播种面积较大，对全区增产贡献率将为 61%，西部区(呼和浩特市、巴彦淖尔市)对全区增产贡献率为 16%。其中，通辽市和赤峰市的短期生产潜力较大，分别为 965.4 万 t 和 592.8 万 t，短期增产潜力分别达 358.2 万 t 和 182.7 万 t；呼和浩特市短期生产潜力最小，仅为 201.4 万 t，但因 YG_E 较大，短期增产潜力为 99.4 万 t，高于呼伦贝尔市、兴安盟和巴彦淖尔市；呼伦贝尔市、兴安盟虽然短期生产潜力达 395.6 万 t 和 426.3 万 t，但由于 YG_E 仅为 1.8 $t\cdot hm^{-2}$ 左右，其短期增产潜力较小，仅为 90.4 万~93.1 万 t；巴彦淖尔市短期生产潜力为 267.9 万 t，但因面积相对较小，短期增产潜力最小，仅为 85.6 万 t。

3 讨论

基于区域尺度的产量差和生产潜力分析是从政策层面合理规划作物生产和从技术层面克服限制因子的重要依据，能否对各级产量平台和产量差进行精确估测至关重要。综合分析内蒙古玉米增产潜力

表 5 内蒙古各生态区玉米的短期、长期增产潜力和产量目标

Table 5 Short- and long-term production potentials and production gaps of maize in different ecological regions of Inner Mongolia

地区 Region	种植面积 Planting area (hm^2)	短期增产潜力 Short-term production gap ($\times 10^4$ t)	短期生产潜力 Short-term production potential ($\times 10^4$ t)	长期增产潜力 Long-term production gap ($\times 10^4$ t)	长期生产潜力 Long-term production potential ($\times 10^4$ t)
呼伦贝尔市 Hulunber	482 409	90.4	395.6	162.8	467.9
兴安盟 Xing'an	514 811	93.1	426.3	212.5	545.7
通辽市 Tongliao	787 442	358.2	965.4	731.4	1 338.7
赤峰市 Chifeng	548 406	182.7	592.8	538.6	948.7
呼和浩特市 Huhhot	151 738	99.4	201.4	151.4	253.4
巴彦淖尔市 BayanNur	192 720	85.6	267.9	164.6	346.9
内蒙古全区 Inner Mongolia	3 170 630	1 191.9	3 525.2	2 385.1	4 719.0

研究的相关文献发现[19–21]，相关研究存在以下几方面的问题：第一，对各级产量平台的估测多以少数样点数据或经验值为依据，对试验产量估测以品种区试产量为依据，没有考虑栽培措施特别是密度对产量的影响；第二，多以小样本数据对全区总体水平进行估测，没有进行分区域的定量化分析，对区域间的生产条件采取单一化处理(如统一设定为雨养)；第三，对生产潜力或增产潜力的分析多以人为设定统一的增产比例或步长来进行计算。上述问题都会导致对生产潜力的定量化产生很大偏差。本研究以多年品种×密度联网试验获得各区域优化密度下的试验产量，以 10 年 81 个点次高产纪录统计值定量化各区域高产纪录产量，以 60 年长期气象背景模拟各区域产量潜力，并以此定量化各区域产量差和生产潜力，不但有效解决了数据的代表性问题，还获得了不同生态区玉米的适宜种植密度，为用 Hybrid-Maize 模型模拟产量潜力提供了科学的数据基础。本研究结果表明，内蒙古玉米的模拟产量潜力为 4.2~22 $t·hm^{-2}$，平均 14.9 $t·hm^{-2}$，明显高于罗瑞林[19]用桑斯维特纪念模型模拟得出的 3.0~8.2 $t·hm^{-2}$ 的结果，其原因一方面是其模拟过程中缺少田间条件和栽培管理信息输入，另一方面其模拟过程将内蒙古全区都作为雨养区，没有对不同区域的水分管理条件进行合理区分，而 Hybrid-Maize 模型则克服了这些问题[11]。各区域模拟产量潜力和高产纪录产量十分接近，说明采用密度联网试验辅助 Hybrid-Maize 模型模拟的方法更加合理。本研究得出内蒙古玉米的 YG_M、YG_R 为 7.0~7.5 $t·hm^{-2}$，农户产量实现了产量潜力的 50%左右(49%~51%)，全区的 YG_E 为 3.8 $t·hm^{-2}$，农户产量实现了试验产量的 66%，这与 Meng 等[4]对我国玉米产量差分析及 Licker 等[22]对全球玉米的产量差分析结果相近，但变异范围则明显小于后者，对试验产量的实现比例也略高于后者，这应该与本研究的对象区域较小且精度较高有关。

本研究基于 YG_E 的估测结果表明，内蒙古玉米短期生产潜力可达 3 525.2 万 t，是当前总产水平的 1.61 倍，说明通过缩小 YG_E 可实现内蒙古玉米生产能力的大幅提高。研究表明，玉米较大的 YG_E 主要是栽培管理措施不当造成的[23]。Meng 等[4]认为目前我国玉米缩小 YG_E 的主要限制因子有以下几个方面：1)种植密度偏低、品种熟期不当或播期不适宜造成的群体光热资源利用效率较低。用 Hybrid-Maize 模型评估表明，我国华北平原玉米密度如从 6 万株·hm^{-2} 提高到 8.5 万株·hm^{-2} 产量可增加 20%~40%[4]。2)水肥管理措施粗放。3)作物管理措施较差，如播种质量差导致群体整齐度低及植保措施不当等。研究表明，玉米出苗不均匀会导致产量损失 4%~12%[4]。侯鹏等[16]认为，土壤条件如耕层障碍等也是限制玉米产量潜力实现程度的重要因素。对于内蒙古玉米产区而言，同样存在这些共性问题，但因内蒙古东西部跨度较大，不同区域的主要限制因子存在明显差异。大兴安岭东南麓雨养区(呼伦贝尔市、兴安盟、赤峰北部丘陵区)的 YG_E 仅为 1.8~1.9 $t·hm^{-2}$，说明该区域品种的气候生产潜力实现程度较好，存在的主要问题是群体密度低(平均保苗 5.5 万株·hm^{-2})、土壤抗旱保墒能力差及肥料特别是氮肥投入不足等，应在适度提高种植密度并提高播种质量的条件下，主要通过深松耕和有机培肥等加强土壤改良，提高土壤蓄水保墒和抗旱缓冲能力，同时加强肥料管理优化，保证密植群体充分的养分供应，防止玉米后期脱肥。西辽河平原和燕山丘陵灌区(通辽市、赤峰市)的 YG_E 为 3.3~4.5 $t·hm^{-2}$，存在主要问题是水肥管理与作物需求不匹配、土壤结构变劣、受品种耐密性差和整地播种质量差影响群体整齐度差等，导致阶段性干旱胁迫重且水肥浪费较大，群体光热水肥利用效率均有较大提升空间；应通过推广节水灌溉和滴灌技术推进水肥一体化，实现水肥供应与群体需求匹配，同时应推广深松耕结合秸秆还田改良耕地质量，提高土壤生产能力和蓄水保肥能力，另外，应选择耐密品种并精量播种提高群体密度至 7.5 万株·hm^{-2} 左右，提高光热资源利用效率，充分挖掘这一高产核心区产量潜力和资源效率。蒙西的土默川平原区和河套地区的 YG_E 较大，为 4.4~6.6 $t·hm^{-2}$，说明该区域的光热资源潜力有很大挖掘空间，存在的主要问题是群体密度低、耕地质量差、干旱胁迫严重和肥料投入过量等，应通过选用熟期适宜的耐密高产品种、提高种子质量和播种密度，结合适度播期调整提高群体光热资源利用效率，同时应通过深松耕、秸秆还田和有机培肥提升耕地质量，另外应加强农田灌溉设施建设、改革灌溉制度以适时适量供水，并通过测土施肥和水肥一体化有效提高水肥利用效率。

综上所述，缩小内蒙古玉米产量差进行产量挖潜需要通过栽培措施综合改良实现，其可行性已在同类研究中得到很好验证。Chen 等[24]通过 Hybrid-Maize 模型驱动的土壤–作物综合管理在 66 个试验点上实现了 13 $t·hm^{-2}$ 的平均产量，达到了玉米产量潜力的 86%，其后续研究指出通过土壤–作物综

合管理可以以较小的资源环境代价生产更多粮食，以保障未来粮食安全[25–26]。当前缩小产量差实现短期增产潜力面临的主要挑战是如何将适应区域性缩差增产的技术简化而使农民易于使用，这一方面需要加强对农业技术推广人员关于栽培管理理念和简化技术的系统培训，另一方面也需要农学、土壤、农业生态学和农业推广等多学科合作[4]，探索出既符合我区农业生产现状特征又符合未来发展趋势和需求的玉米增产增效技术途径。

4 结论

在我国农业“调结构、转方式”的总体发展背景下，科学评估内蒙古玉米产量差和生产潜力，探讨缩差增产的有效途径具有重要意义。本研究采用密度联网试验和 Hybrid-Maize 模型相结合的方法，对内蒙古全区及不同生态区的玉米产量差和生产潜力进行了定量化评估。内蒙古玉米模拟产量潜力为 14.9 $t \cdot hm^{-2}$，高产纪录产量为 14.4 $t \cdot hm^{-2}$，试验产量为 11.1 $t \cdot hm^{-2}$，农户产量分别实现了模拟产量潜力的 49%、高产纪录产量的 51%，实现了试验产量的 66%。对于 3 个产量差来说，YG_M、YG_R、YG_E 分别为 7.5 $t \cdot hm^{-2}$、7.0 $t \cdot hm^{-2}$ 和 3.8 $t \cdot hm^{-2}$；基于 YG_E 的短期生产潜力达 3 525.2 万 t，短期增产潜力为 1 191.9 万 t。缩小 YG_E 需要针对限制各生态区玉米增产的实际生产问题，通过多学科、多部门合作进行栽培技术综合改良、技术简化和技术入户来逐步实现。

参考文献 References

[1] FAO UN. How to Feed the World in 2050[C]. Rome: High-Level Expert Forum, 2009

[2] 刘保花, 陈新平, 崔振岭, 等. 三大粮食作物产量潜力与产量差研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(5): 525–534
Liu B H, Chen X P, Cui Z L, et al. Research advance in yield potential and yield gap of three major cereal crops[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2015, 23(5): 525–534

[3] Tollenaar M, Lee E A. Yield potential, yield stability and stress tolerance in maize[J]. Field Crop Research, 2002, 75: 161–169

[4] Meng Q F, Hou P, Wu L, et al. Understanding production potentials and yield gaps in intensive maize production in China[J]. Field Crops Research, 2013, 143: 91–97

[5] Lobell D B, Cassman K G, Field C B. Crop yield gaps: Their importance, magnitudes and causes[J]. Annual Review of Environment and Resources, 2009, 34: 179–204

[6] 王涛, 吕昌河, 于伯华. 基于 WOFOST 模型的京津冀地区冬小麦生产潜力评价[J]. 自然资源学报, 2010, 3: 475–787
Wang T, Lü C H, Yu B H. Assessing the potential productivity of winter wheat using WOFOST in the Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. Journal of Natural Resources, 2010, 3: 475–787

[7] 蔡承智, van Velthuizen H, Fischer G, 等. 基于 AEZ 模型我国农作制区划的玉米产量潜力分析[J]. 玉米科学, 2006, 14(4): 158–161
Cai C Z, van Velthuizen H, Fischer G, et al. Analyses of maize yield potential by Chinese farming system zoning based on AEZ model[J]. Maize Science, 2006, 14(4): 158–161

[8] 余卫东, 马志红. 近 50 年河南省夏玉米生产潜力及产量差时空变化特征[J]. 干旱地区农业研究, 2015, 33(1): 205–212
Yu W D, Ma Z H. Temporal-spatial variation of yield potential and yield gaps of summer maize during the past 50 years in Henan Province[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2015, 33(1): 205–212

[9] 戴明宏, 陶洪斌, 廖树华, 等. 基于 CERES-Maize 模型的华北平原玉米生产潜力的估算与分析[J]. 农业工程学报, 2008, 24(4): 30–36
Dai M H, Tao H B, Liao S H, et al. Estimation and analysis of maize potential productivity based on CERES-Maize model in the North China Plain[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(4): 30–36

[10] 王静, 杨晓光, 吕硕, 等. 黑龙江省春玉米产量潜力及产量差的时空分布特[J]. 中国农业科学, 2012, 45(10): 1914–1925
Wang J, Yang X G, Lü S, et al. Spatial-temporal characteristics of potential yields and yield gaps of spring maize in Heilongjiang Province[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2012, 45(10): 1914–1925

[11] 侯鹏, 陈新平, 崔振岭, 等. 基于 Hybrid-Maize 模型的黑龙江春玉米灌溉增产潜力评估[J]. 农业工程学报, 2013, 29(9): 103–112
Hou P, Chen X P, Cui Z L, et al. Evaluation of yield increasing potential by irrigation of spring maize in Heilongjiang Province based on Hybrid-Maize model[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(9): 103–112

[12] Van Wart J, Kersebaum K C, Peng S B, et al. Estimating crop yield potential at regional to national scales[J]. Field Crops Research, 2013, 143: 34–43

[13] Grassini P, Yang H S, Irmak S, et al. Limits to maize productivity in Western Corn-Belt: A simulation analysis for fully irrigated and rainfed conditions[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2009, 149: 1254–1265

[14] Timsina J, Jat M L, Majumdar K. Rice-maize systems of South Asia: Current status, future prospects and research priorities for nutrient management[J]. Plant Soil, 2010, 335: 65–82

[15] 刘毅, 李世清, 陈新平, 等. 黄土旱塬 Hybrid-Maize 模型适应性及春玉米生产潜力估算[J]. 农业工程学报, 2008, 24(12) 302–308
Liu Y, Li S Q, Chen X P, et al. Adaptability of Hybrid-Maize model and potential productivity estimation of spring maize on dry highland of loess plateau[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(12): 302–308

[16] 侯鹏, 陈新平, 崔振岭, 等. 4 种典型土壤上玉米产量潜力的实现程度及其因素分析[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(7): 874–881

Hou P, Chen X P, Cui Z L, et al. Potential maize yield realization and related driving factors in four typical soils[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2012, 20(7): 874−881

[17] 卜令铎. 旱地春玉米高产高效栽培体系构建、评价及区域模拟[D]. 陕西: 西北农林科技大学, 2013

Bu L D. The cultivation system establishment and assessment contributing to yield and efficiency improvement of dryland maize, and regional simulation[D]. Shaanxi: Northwest A＆F University, 2013

[18] Yang H S, Dobermann A, Lindquist J L, et al. Hybrid-Maize — A maize simulation model that combines two crop modeling approaches[J]. Field Crops Research, 2004, 87: 131–154

[19] 罗瑞林. 气候变化对内蒙古春玉米产量影响的研究[D]. 内蒙古: 内蒙古农业大学, 2013: 46–47

Luo R L. Impacts of climate change on spring maize production in Inner Mongolia[D]. Inner Mongolia: Inner Mongolia Agriculture University, 2013: 46–47

[20] 王贵平, 包立华. 内蒙古三大粮食作物增产增收潜力分析[J]. 中国农技推广, 2013, 2: 4–5

Wang G P, Bao L H. Analysis of production and profit potential of the three stable crops in Inner Mongolia[J]. China Agricultural Technology Extension, 2013, 2: 4–5

[21] 武向良, 胡有林, 马超, 等. 内蒙古自治区玉米“十二五”增产潜力分析[J]. 农业展望, 2011, 4: 32–34

Wu X L, Hu Y L, Ma C, et al. The analysis of yield increasing potential of maize in Inner Mongolia during the 12th Five-Year Plan[J]. Agricultural Outlook, 2011, 4: 32–34

[22] Licker R, Johnston M, Foley J A, et al. Mind the gap: How do climate and agricultural management explain the ‘yield gap’ of croplands around the world[J]. Global Ecology and Biogeography, 2010, 19(6): 769–782

[23] Zhang F S, Cui Z L, Fan M S. Integrated soil-crop system management: Reducing environmental risk while increasing crop productivity and improving nutrient use efficiency in China[J]. Journal of Environmental Quality, 2011, 40: 1051–1057

[24] Chen X P, Cui Z L, Vitousek P M, et al. Integrated soil-crop system management for food security[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2011,108: 6399–6404

[25] Chen X P, Cui Z L, Fan M S, et al. Producing more grain with environmental costs[J]. Nature, 2014, 514: 486–489

[26] Matson P A, Vitousek P M. Agricultural intensification: Will land spared from farming be land spared for nature?[J]. Conservation Biology, 2006, 20: 709–710